新概念高能率超平滑立型平面研削盤の

設計と試作（第1報）*

— その考え方と一、二の実験的検討 —

安井 平 司** 山本 雄 記***

Trial Manufacturing of Productive Ultra-smoothness Vertical Surface Grinder Based on the New Concept (1st Report)

— Theory and Some Experimental Results —

Heiji YASUI and Yuki YAMAMOTO

In the previous research, the ultra-smoothness grinding method based on the new concept is developed and applied to the horizontal surface grinder. From the results, the surface roughness is found to attain below 50nm(R_z) in grinding of a cemented carbide, a glass, ceramics and so on. The removal rate obtained using the horizontal surface grinder, however, is small though the rate is larger than lapping and polishing. First of all, in the research, in order to make the rate much larger, the rate in ultra-smoothness grinding method is analyzed. On the basis of the analysis, the vertical surface grinder is designed and manufactured on trial. Furthermore the grinding characteristics using the vertical surface grinder is examined. Comparing with the removal rate obtained using the horizontal surface grinder in the previous research, the removal rate attains 10 times in the same smoothness.

Key words: ultra-smoothness grinding, new concept, vertical surface grinder, horizontal surface grinder, nanometer, removal rate, theory, experiment

1. はじめに

現在、各種材料の最終的な高平滑加工には、ラッピング加工やポリッシング加工などの遊離砥粒を用いた研摩加工が使用される。しかし、これらの研摩加工は、加工能率が悪いことや、加工精度の向上が容易ではない等、幾つかの基本的な問題を抱えている。そこで、筆者らの一人は、精度向上も比較的容易に可能な研削加工法による新概念超平滑法を考案し、角テーブル型横軸平面研削盤に適用した¹⁾。そして、各種材料において2次元仕上面粗さで、50nm(R_z)以下の超平滑仕上面粗さとなる有用な結果が得られた。しかし、加工能率（除去速度）は研摩加工より高いものの格段に高いとは言えず、加工能率の向上が大きな問題であった。

本研究では、このことから、超平滑研削法における除去速度を解析した上で、新たに高能率超平滑立型研削盤を設計・試作し、一、二の実験を行った。以下に結果を報告する。

2. 新概念超平滑研削法と除去速度

先に開発した超平滑研削法は、角テーブル型横軸平面研削に適用して検討を行った。その加工法は、図1に示すように、(1)従来のトラバース研削法とは逆に、まず砥石あるいは工作物を研削方向とは直角方向に、砥石一回転あたりの工作物直角送り量 f_{Gn} が、研削方向と直角方向の切れ刃逃げ面摩耗幅 w_n (逃げ面が連なるとみなされる場合には、それを重畳したもの) 以下となるような送り速度で、砥石—工作物接触幅を加工する（第一の要項）。次いで、(2)幾何学的に計算される砥石—工作物の干涉高さ（研削方向平行仕上面粗さ H_p に相当）が、要求する高平滑仕上面粗さ H_{max} 以下になるように、工作物を微小に研削方向平行送り量 f_p

Fig.1 Schematic diagram of the ultra-smoothness grinding method developed due to new concept

だけ、間欠的に移動させる（第二の要項）。そして、先に送った研削方向直角送り方向とは反対の方向に工作物を送り、次の砥石—工作物接触幅を仕上げる。開発された超平滑研削法は、このようなことを繰り返して、工作物全面を加工し、研摩加工に替え得る、あるいは、研摩加工に近い超平滑研削加工を行おうとするものである。

超平滑研削法の要項を基に、単位時間当たりの除去量 M (除去速度) を検討してみる。まず、超平滑研削法の第一の要項は次式で表すことができる。

$$f_{Gn} < w_n \quad (1)$$

また、第二の要項は、幾何学的に算出される研削方向平行仕上面粗さ H_p が所要の仕上面粗さ H_{max} より小さくしなければならないので、次式を満たす必要がある。

* 原稿受付 平成 18 年 6 月 29 日

** 正 会 員 熊本大学大学院（熊本市黒髪 2-39-1）

*** 学生会員 熊本大学大学院

Fig.2 Influence of normal feed rate f_{Gn} on surface roughness

$$H_{\max} \approx f_p^2 / 4D_g \quad (2)$$

ここで、 D_g :砥石直径である。

一方、除去速度 M は、図1において、1研削パスあたりの研削方向直角除去面積を S 、工作物の送り速度を v_{wn} とすると、次式で与えられる。

$$M = S \cdot v_{wn} \quad (3)$$

式(3)において、砥石の送り速度 v_{wn} と S は次のように表される。

$$v_{wn} = f_{Gn} \cdot N_g \quad (4)$$

$$S = (l_c \cdot g_{\max}) / 2 \quad (5)$$

ここで、 N_g :砥石回転数、 $l_c = (t_g \cdot D_g)^{0.5}$:接触弧長さ、 $g_{\max} = f_p \cdot (4t_g / D_g)^{0.5}$:最大砥粒切込み深さ、 t_g :砥石切込み深さである。

式(4)と(5)を式(3)に代入すると、除去速度 M は次式で表される。

$$M = f_p \cdot t_g \cdot N_g \cdot f_{Gn} \quad (6)$$

したがって、式(6)より、超平滑研削法の加工能率を向上させるためには、 f_p 、 t_g 、 N_g 、 f_{Gn} のいずれかの項目を大きくすればよい。以下に、除去速度に及ぼす各項目の効果を検討する。

まず、第1項目の f_{Gn} であるが、 f_{Gn} と炭化けい素セラミックを超平滑研削法を用いて研削した場合の仕上面粗さの関係を実験的に検討した結果を図2に示す。なお、砥石作業面は、超平滑研削加工法が容易に可能となるように、多くの形直し・目直し・研削条件で調整した中で、ほぼ最適に調整し得たものを用いている。図より、 $f_{Gn} = 30 \mu\text{m}$ 程度までは、3次元仕上面粗さで $50 \text{nm}(R_z)$ 以下、または、2次元仕上面粗さでは約 $20 \text{nm}(R_z)$ 以下の超平滑研削面となるのがわかる。しかし、 f_{Gn} が $30 \mu\text{m}$ 付近のある臨界工作物直角送り量 $(f_{Gn})_{cr}$ を超えると、仕上面粗さが急激に悪化し、 $100 \text{nm}(R_z)$ になる。このことより、 $(f_{Gn})_{cr}$ は数十 μm と小さく、現在の形直し・目直し・研削による砥石作業面性状の調整によって、切れ刃逃げ面が大きく連なる状態にし得ないことが考えられる。この点は、今後も、検討する必要があると思われるが、いずれにしても、現状では、超平滑研削を保ちながら、 f_{Gn} を大きく増加し得る可能性は小さいと思われる。

次に、第2項目の t_g については、取り代と関係する量であり、適宜に変化し得る量ではない。ただし、取り代が大きい場合には、砥石軸剛性が耐える範囲で、研削焼け・割れなど、工作物仕上面に悪影響を及ぼす現象が発生しない研削条件の範囲で、砥石切込みを大きくすることは可能と言える。

第3項目の f_p であるが、上述のように超平滑研削を行うためには、式(2)を満たす必要がある。式(2)からわかるように、 f_p を増加させると、それに合わせて砥石直径をその2乗で大きくしなければ、同じ仕上面粗さを得ることができない。図3に、砥石直径

Fig.3 Relationship between parallel surface roughness and parallel step-feed

をパラメータとした、 f_p と幾何学的研削方向直角仕上面粗さ H_p の関係を示す。砥石直径は $D_g = \phi 10 \text{mm} \sim \phi 300 \text{mm}$ の範囲で示している。図において、超平滑研削法で期待している、 $100 \text{nm}(R_z)$ 以下の仕上面粗さで考えると、砥石直径 $\phi 10 \text{mm}$ では、 f_p は約 $63 \mu\text{m}$ であり、一方、 $\phi 300 \text{mm}$ の砥石では f_p は約 $350 \mu\text{m}$ となり、その比は5.5倍程度である。したがって、砥石直径を大きくすることが、除去速度の向上には有効であるといえる。

最後の項目の N_g であるが、これは、砥石の回転破壊に関係する許容砥石周速度 $(V_g)_{\max} = \pi \cdot N_g \cdot D_g$ (現状では、最大実用許容速度は 200m/s 程度であるが、 100m/s が通常研削の目安と考えられる) や、砥石軸直径 D と回転数 N の積により決められる $D \cdot N$ 値の最大許容値である $(D \cdot N)_{\max}$ (現状では $2,500,000$ 程度と考えられる。) 以下にすることが拘束条件になる。したがって、最大許容砥石回転数 $(N_g)_{\max}$ は、 $(N_g)_{\max} = (V_g)_{\max} / \pi \cdot D_g$ または $(N_g)_{\max} = (D \cdot N)_{\max} / D_g$ などの式を用いて、計算決定し、それ以下の砥石回転数で使用する必要がある。 $D \cdot N$ 値で決める場合には、砥石直径と回転数の積が一定なので、使用できる最大許容砥石回転数は、砥石直径に反比例して増加する。例えば、 $\phi 300 \text{mm}$ の砥石を使用する場合に比べて、 $\phi 10 \text{mm}$ の砥石を使用すると、最大回転数は30倍まで大きくすることができる。

以上の検討からすると、除去速度 M を大きくするためには、 f_p と N_g を大きくすることが適当と考えられるが、それらの最大許容値は、砥石直径に関係する。砥石直径を小さくすると、それに反比例して最大許容砥石回転数を大きくすることができるが、最大許容送りは、式(2)より、 $1/2$ 乗に反比例してしか大きくできない。このことから、 M は、数式的には、砥石直径を小さくして、砥石回転数を大きくするほうが、より大きくすることができる。例えば、前述のように同じ仕上面粗さを得る場合に、砥石直径が $\phi 300 \text{mm}$ の砥石のほうが、直径 $\phi 10 \text{mm}$ の場合より、 f_p を大きくできるから、除去速度を5.5倍まで増加することができる。この一方、最大許容砥石回転数の観点からすれば、砥石直径が $\phi 10 \text{mm}$ の方が、砥石直径が $\phi 300 \text{mm}$ の場合に比べ、砥石回転数を30倍大きくできる。したがって、除去速度も30倍となり、砥石直径が小さなものを、高速で回転させるほうが、除去速度をより大きくすることができると言える。実際には、直径 $\phi 5 \text{mm}$ の砥石を $150,000 \text{rpm}(2,500 \text{rps})$ 程度まで回転させ、約 40m/s の砥石周速度で研削することは可能であるが、それ以上の回転数で回転することは必ずしも容易ではない。しかし、直径 $\phi 300 \text{mm}$ の砥石で 200m/s の研削を行う場合の砥石周速度は、約 210rps であり、その砥石回転数比は約10倍を超える。砥石直径 $\phi 10 \text{mm}$ の場合も $90,000 \text{rpm}(1,500 \text{rps})$ 程度の回転の研削は比較的容易に可能であり、その

(a) Ultra-smoothness vertical grinding method

(b) Effect of axis inclination

Fig.4 Geometry of ultra-smoothness vertical grinding method

Fig.5 Schematic diagram of ordinal vertical grinding method

砥石回転数は約7倍である。このようなことから、小径の砥石を使用の方が、除去速度への効果は大きいと考えられる。小径の砥石を使用する場合、高速スピンドルを使用する必要があるものの、砥石製造価格も低く、また、小さく安価な研削盤で加工が可能であるという利点もある。

以上、角テーブル型横軸研削の場合を例にとって除去速度の向上策を検討したが、角テーブル型横軸研削盤の場合には、図1に示すように、砥石軸と工作物表面とは平行である。小径砥石を取付けるスピンドル軸の外殻外径は、通常、小径砥石外径よりもはるかに大きく、横軸角テーブル型研削盤で高速スピンドルを用いるのは、實際上、難しい。そこで、小径の砥石を用いても、実現できるようにするために、図4のような立軸平面研削盤による超平滑研削が考えられる。工作物の加工面（図4におけるX-Y平面）に直角な方向（Z軸方向）に対する傾き角を $\theta=0^\circ$ とすると、研削液の砥石-工作物接触域への供給や切屑の排出が難しくなり、目つまりの発生が生じやすくなることが予測される。そこで、砥石軸をZ軸に対して小さな角度 θ だけ傾けて研削を行う方法が考えられる。砥石軸をZ方向に対して傾けた場合の幾何学的仕上面粗さ $(H_p)'$ は、横軸研削の幾何学的仕上面粗さ H_p に対して $(H_p)'=H_p \cdot \sin\theta$ となるので、この砥石軸傾き角を小さく傾けることで、同じ直径の砥石を用いても、横軸平面研削加工の場合よりも仕上面粗さを小さく抑えることもできる。言い換えれば、小径

Fig.6 Influence of parallel step-feed and wheel inclination on parallel surface roughness

Fig.7 Comparison of the removal rate obtained using horizontal surface grinder with using vertical surface grinder in the same surface roughness

[Horizontal grinder: $D_g=100\text{mm}$, $N_g=159\text{rps}$, $f_p=40\mu\text{m}$]
[Vertical grinder: $\theta=3^\circ$, $D_g=14\text{mm}$, $N_g=1137\text{rps}$, $f_p=60\mu\text{m}$]

砥石を用いた立軸研削では、横軸角テーブル研削加工法に比較して、砥石-工作物接触弧長さを大きくでき、研削方向間欠送り量 f_p を小さくせずに高平滑な仕上面を得ることが可能となる。なお、この方法は、図5に示すような、カップ砥石の正面を作業面とする、通常行われている立軸平面研削法とは異なる概念の方法である。

図6は、直径10mmの小径砥石の研削方向平行間欠送り量 f_p および砥石軸傾き角 θ と、仕上面粗さ H_p' の関係を示すものである。図より、Z軸方向に対して 90° の傾き角をもつ横軸平面研削における砥石軸を大きく傾け、Z軸方向に対して小さな傾き角の立軸研削方式にすると、幾何学的仕上面粗さは非常に小さくなるのがわかる。例えば、砥石軸の傾き角を 3° にし、立軸研削に近いものとする、 $f_p=80\mu\text{m}$ としても、 H_p' は約9nmとなり、仕上面粗さを十分に小さくすることができる。なお、砥石直径が10倍の $\phi 100\text{mm}$ の砥石を横軸研削盤に取り付ける場合は、 $f_p=80\mu\text{m}$ で、 $H_p=16\text{nm}$ となる。このように、立軸研削で、砥石軸を小さく傾けた場合には、横軸研削盤の場合よりも、研削方向平行間欠送り量 f_p を大きくしても、幾何学的仕上面粗さが小さくできることがわかる。

図7は砥石周速度を50m/sとし、(1)通常の横軸研削でよく使用されている砥石としては小さい方の砥石直径である、砥石直径が100mmの砥石を用いて、角テーブル型横軸平面研削盤で超平滑研削法を行う場合と、(2)砥石直径が $\phi 14\text{mm}$ の小径砥石をZ軸方向に対して 3° 傾けて超平滑立軸研削を行う場合の除去速度を比較したものである。砥石周速度が50m/sの場合、 $\phi 100\text{mm}$ の砥石と、 $\phi 14\text{mm}$ の砥石の回転数はそれぞれ、約159rps、1137rpsである。なお、両研削法の場合とも、砥石一回転あたりの研削方向直角送り量は $f_{gn}=20\mu\text{m/rev}$ と、同じにし、形成される幾何学的仕上

Fig.8 Schematic diagram of the movement mechanism of the new vertical grinder

面粗さは約 4nm としている。このため、両研削法とも幾何学的仕上面粗さが 4nm となるように、研削方向間欠送り量 f_p は横軸研削の場合は $f_p=40\mu\text{m}$ 、立軸研削の場合は $f_p=65\mu\text{m}$ として除去速度の計算を行った。図より、比較した条件での結果であるが、立軸研削の場合に得られる除去速度は、横軸研削の場合に得られる除去速度の 11 倍以上になる。このように、加工能率が格段に向上し得るのがわかり、超平滑研削法の高除去速度化への立軸研削法の有用性が考えられる。

3. 超平滑立軸研削盤の試作

3.1 試作超平滑立軸研削盤の特徴

図 8 に、上述のような観点から試作した、回転テーブルと角テーブルを有した、立軸研削盤の運動機構を示す。両立軸研削盤の場合とも、スピンドルの、X-Y 平面に直角な Z 軸方向運動精度、すなわち切込みの精度は、サーボモータ駆動精度上では 100nm 以下となっており、概括的な測定結果では、その精度を満たしている。また、円テーブル型では、工作物を加工するために、工作物を取り付けたテーブルを回転させるとともに、スピンドルを回転テーブルの中心軸上を半径方向（Y 軸方向）にサーボモータで運動させることができる。その移動精度も、サーボモータ駆動精度上では、やはり 100nm 以下である。一方、角テーブル型では、X-Y テーブル上に工作物を取り付けて、サーボモータの運動精度 100nm 以下でテーブルを動かし、加工を行う。

全てのサーボモータは、パーソナルコンピュータで、Visual Basic プログラムにより制御を行い自動化が可能である。

3.2 回転テーブル型立軸超平滑研削盤

図 9 は、改造試作した回転テーブル型立軸平面研削盤の外観写真である。回転テーブルの上に設置された工作物は、図 8（a）に示すように、回転方向に送られる。一方、スピンドルは回転テーブルの半径方向と上下方向（Z 軸方向）に送られる。砥石軸とスピンドルは X-Y テーブルに直角な方向、すなわち Z 軸方向に対して、任意に傾けることができる。主な装置仕様を表 1 に示す。

3.3 角テーブル型立軸超平滑研削盤

図 10 は、試作した 4 コラム式角テーブル型立軸平面研削盤の外観写真である。本装置は図 8（b）のような XY テーブルを有しており、この上に工作物を設置する。砥石軸は Z 軸方向に対しての傾き角を 6.5° まで、無段階に傾けることが可能である。研削加工は、砥石が Z 軸方向に微小角傾けられた状態で Z 軸方向に切込みが与えられて、実施される。試作した装置の仕様を表 2 にまとめる。

Fig.9 Ultra-smoothness vertical grinder rebuilt from a conventional machine

Table 1 Specifications of conventional vertical surface grinder (SVG-350RM)

Maximum feed length	R : 150 mm Z : 100 mm
Feed accuracy	X, Y, Z: 62 nm
Table working diameter	ϕ 170 mm
Wheel revolution	12,000 - 120,000 rpm
Wheel inclination angle	θ : 0 - 5 deg
Size	1000 x 1340 x 1720 mm (W x L x H)
Weight	1200 kg

Fig.10 Appearance of ultra-smoothness vertical surface grinder manufactured on trial

Table 2 Specifications of ultra-smoothness vertical surface grinder manufactured on trial

Maximum feed length	X, Y : 200 mm Z : 180 mm
Feed accuracy	X, Y, Z: 62 nm
Table working area	170 x 170 mm
Wheel revolution	12,000 - 150,000 rpm
Wheel inclination angle	θ : 0 - 6.5 deg
Size	730 x 555 x 1920 mm (W x L x H)
Weight	900 kg

外観写真である。本装置は図 8（b）のような XY テーブルを有しており、この上に工作物を設置する。砥石軸は Z 軸方向に対しての傾き角を 6.5° まで、無段階に傾けることが可能である。研削加工は、砥石が Z 軸方向に微小角傾けられた状態で Z 軸方向に切込みが与えられて、実施される。試作した装置の仕様を表 2 にまとめる。

Table 3 Experimental conditions

Workpiece	Cemented Carbide (P20)
Wheel	SD140Q50M (Horizontal grinder) SD140Q100M (Vertical grinder)
Wheel revolution : N_g	3,000 rpm (Horizontal grinder) 30,000 rpm (Vertical grinder)
Wheel speed : V_g	15 m/s
Depth of cut : t_g	5 μm
Normal feed : f_{gn}	10 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Table speed : v_{wn}	0.5 mm/s (Horizontal grinder) 5 mm/s (Vertical grinder)
Parallel feed : f_p	10 μm
Grinding fluid	Soluble type (1/50)

4. 実験方法及び条件

実験は図9および図10に示した両立軸研削盤で行ったが、同様な結果が得られたので、ここでは、図10の試作角テーブル型立軸平面研削盤の結果を示す。本実験で使用した砥石の直径は $\phi 10\text{mm}$ である。工作物には超硬合金を使用した。表3に実験条件を示す。なお、砥石作業面は、超平滑研削加工法が容易に可能となるように、多くの形直し・目直し・研削条件で調整した中で、ほぼ最適に調整し得たものを用いた。得られた仕上面は微分干渉顕微鏡で観察し、光干渉式高精度表面測定器（WYKO）で仕上面粗さの測定を行った。

5. 実験結果および考察

図11は、試作角テーブル型立軸平面研削盤を用いて研削した、超硬合金の超平滑研削仕上面を、微分干渉顕微鏡で観察した結果である。なお、比較のため、先に報告したNC横軸角テーブル型高精度平面研削盤（NACHI製UMGⅢ）を用いた実験結果も示す。図より、仕上面上には、小さな圧痕や、研削条痕があるものの、両研削法の場合とも、非常に良好な仕上面であるのがわかる。

得られた仕上面粗さをWYKOで測定した結果を図12に示す。図より、横軸研削盤の場合の三次元仕上面粗さは44.96nm(R_z)、または3.90nm(R_a)である。一方、立軸研削盤の場合に得られた三次元仕上面粗さは37.82nm(R_z)、または、3.75nm(R_a)であり、横軸研削盤の場合と同様に、非常に高平滑な仕上げ面が得られた。超平滑研削法を立軸研削盤に適用しても、先に横軸研削盤に適用した場合と同程度の仕上げ面を得ることができたといえる。

その上で、超平滑研削法を両研削盤に適用した場合の除去速度を考えると、先に横軸研削盤で使用した砥石の直径が $\phi 100\text{mm}$ であり、立軸研削盤で使用している砥石直径の10倍である。したがって、同じ砥石周速度でも、立軸研削盤の方が砥石回転数は10倍大きく、工作物送り速度も10倍速い。式(6)で示した、その他の除去速度に関する項目、 t_g 、 f_{gn} 、 f_p は同じ値であるので、超平滑研削法を立軸研削盤に適用した方が横軸研削盤に適用した場合に比べ加工能率も10倍大きいことがいえ、超平滑立軸研削法の有用性が伺える。

6. ま と め

新概念超平滑研削法の除去速度を向上させるため、本研削法の除去速度を理論的に検討した上で、高除去速度が可能な、立軸超平滑研削盤を考案し、設計試作した。そして、超硬合金の平面研削をおこない、以下の結果を得た。

- (1) 超平滑研削法の除去速度は、砥石切込み量・砥石回転数・砥石一回転あたりの工作物送り量・間欠送り量の積である。

Fig.11 Cemented carbide ground by ultra-smoothness grinding method using horizontal and vertical grinder
[Cemented carbide, $V_g=15\text{m/s}$, $f_{gn}=10\mu\text{m}/\text{rev}$, $t_g=5\mu\text{m}$, $f_p=10\mu\text{m}$, Soluble (1/50)]

(a) Horizontal grinding (SD140Q50M)

(b) Vertical grinding (SD140Q100M)

Fig.12 Comparison of surface roughness of cemented carbide ground by ultra-smoothness grinding method using horizontal and vertical grinder
[Cemented carbide, $V_g=15\text{m/s}$, $f_{gn}=10\mu\text{m}/\text{rev}$, $t_g=5\mu\text{m}$, $f_p=10\mu\text{m}$, Soluble (1/50)]

- (2) 超平滑研削法の加工能率を向上させるために、小径の砥石を高速回転させることが有効である。
- (3) 軸付砥石を、工作物の加工面に直角な方向に対して微小に傾けて用いることで、研削方向間欠送り量を大きくしても、大きな直径の砥石を用いた横軸研削盤方式と同等の幾何学的仕上面粗さを得ることができる。
- (4) 試作した、立軸研削盤を用いて、先に報告した横軸平面研削の場合の10倍の除去速度で研削した超硬合金の三次元仕上面粗さは、横軸と同等の37.82nm(R_z)、または、3.75nm(R_a)の高平滑な仕上げ面が得られた。

終わりに、本研究を行うまでの、経過的な研究で支援を得た谷口龍氏、村井征聖、坂西敬一氏、相島功治氏ならびに古屋晶吾氏と、砥石、研削液、工作物について、ご提供やご支援を頂いた、(株)ノリタケスーパアブレーション、ユシロ化学工業(株)ならびに(株)タンガロイに謝意を表す。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)(2)[課題番号15360072]で行った。

参 考 文 献

- (1) 安井平司: 研摩レス超平滑研削法の開発(第1報)ーその考え方とー、二の実験的検討ー、精密工学会誌, 69, 12(2003)1713.